

基于三角级数拟合的间接飞行时间相机谐波误差校正方法

姜兆祥^{1,2}, 宋展¹, 肖振中^{2*}, 马宣³, 师少光², 王飞⁴

¹中国科学院深圳先进技术研究院, 广东 深圳 518055;

²奥比中光科技集团股份有限公司, 广东 深圳 518062;

³南方科技大学微电子学院, 广东 深圳 518055;

⁴深圳奥芯微视科技有限公司, 广东 深圳 518062

摘要 因激光发射端光波形和图像传感器抽头光响应的非理想因素, 间接飞行时间(ITOF)相机测距结果与真实距离之间存在摆动式的谐波误差, 测距准确度受到干扰。分析 ITOF 相机中谐波误差的产生原因, 阐明谐波误差周期与测距周期、像素抽头数量的关系, 并提出基于三角级数拟合校正谐波误差的方法。所提方法可在较短标定范围和较大标定间隔下拟合校正谐波误差, 标定效率高。利用 66.67 MHz 三抽头 ITOF 相机测距实验对所提方法的有效性进行验证。实验结果表明, 所提方法能够有效减小测距结果中的谐波误差, 主点像素测距平均准确度达 2.5787 mm, 平面测距结果中的平面拟合平均误差达 4.3876 mm。

关键词 遥感和传感器; 间接飞行时间相机; 深度标定; 谐波误差

中图分类号 TP212.1 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230458

Triangular Series Fitting-Based Harmonic Error Correction Method for Indirect Time-of-Flight Camera

Jiang Zhaoxiang^{1,2}, Song Zhan¹, Xiao Zhenzhong^{2*}, Ma Xuan³, Shi Shaoguang², Wang Fei⁴

¹Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, Guangdong, China;

²Orbbec Inc, Shenzhen 518062, Guangdong, China;

³School of Microelectronics, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, Guangdong, China;

⁴Shenzhen Oxin Technology Co., Ltd., Shenzhen 518062, Guangdong, China

Abstract A swinging harmonic error occurs between the measured distance of the indirect time-of-flight (ITOF) camera and the real distance due to the nonideal factors of the optical waveform of the laser transmitter and the tap response of the imaging sensor. The harmonic error can interfere with the accuracy of distance measurement. This paper analyzes the causes of harmonic error in ITOF cameras and clarifies the relationship between the harmonic error period, ranging period, and number of pixel taps. Based on triangular series fitting, this work proposes a method to correct such harmonic errors in a short calibration range and a large calibration step, which improves the calibration efficiency. The effectiveness of the proposed method is verified through 66.67 MHz 3-tap ITOF camera ranging experiments. The experimental results show that the average distance measurement accuracy of the principal point pixel is 2.5787 mm, while the average plane fitting error in the plane distance measurement is 4.3876 mm. Thus, the findings emphasize that the proposed method can effectively reduce the harmonic errors in distance measurements using ITOF cameras.

Key words remote sensing and sensor; indirect time-of-flight camera; depth calibration; harmonic error

1 引言

近些年, 三维传感技术逐步发展成熟, 被广泛应用

于手机支付、机器人导航、场景重建等诸多领域^[1-3]。在基于飞行时间、三角测量、计算光场成像等原理^[4-6]的三维传感器件中, 间接飞行时间(ITOF)相机因测距

收稿日期: 2023-01-05; 修回日期: 2023-02-01; 录用日期: 2023-02-06; 网络首发日期: 2023-02-16

基金项目: 河套深港科技创新合作区深圳园区科研及创新创业项目(HZQB-KCZYB-2020098)

通信作者: *xiaozhenzhong@orbbec.com

计算简单、结构紧凑、测距范围远和抗环境光干扰能力强等优势而受到关注^[7-11]。

ITOF 相机由激光发射端和 ITOF 图像传感器组成。激光发射端发射强度周期调制的红外光波信号,光信号经场景反射后,被 ITOF 图像传感器像素中依次曝光的抽头收集,携带相移信息,经相移法计算得到光波相位后,可根据光速和调制频率推知光波的飞行距离。然而,因为硬件限制、成本高等因素,实际发射端光波形和像素中抽头光响应的相关信号无法等同于相位计算模型中理想的余弦信号,存在高次谐波成分,导致 ITOF 相机测距结果存在随真实距离改变而振荡变化的偏差,即谐波误差。谐波误差降低了 ITOF 相机测距结果的准确度,限制了 ITOF 相机在三维扫描、重建等需要较高测距准确度场景中的应用。

为了处理谐波误差,提高测距准确度,研究者提出了诸多方法。这些方法大体可以分为两类:一类是基于谐波混淆原理优化光波形、抵消高频谐波成分以降低谐波误差水平的方法^[12-16],如 Payne 等^[12-13]通过在光波形中引入相移,抵消相关信号中的部分高次谐波成分;另一类是直接对谐波误差进行拟合校正的方法^[17-21],如 Kuhlmann 等^[17]通过标定测距结果与真实距离的关系并建立查找表对测距结果进行补偿。两类方法都能减小谐波误差对测距准确度的影响,然而第一类方法通常涉及对 ITOF 相机硬件的修改,通用性不强;而第二类方法虽然适用范围广,但使用的拟合校正方法如 B 样条插值、多项式插值等多源于工程经验,同时需在测距范围内以稠密间隔标定谐波误差,效率较低。

针对上述问题,本文结合了两类方法的特点,首先从理论上分析了 ITOF 相机中谐波误差的产生原因,

阐明谐波误差的周期特性与抽头数量的关系;然后以此为理论依据,提出使用三角级数拟合校正谐波误差的方法,并讨论了整幅图像中谐波误差的拟合策略以及标定数据采集的范围和间隔设置;最后通过实际 ITOF 相机测距实验验证所提方法的有效性。

2 谐波误差理论分析

图 1 给出了 ITOF 相机的测量示意图。激光发射端发射周期调制的红外光波信号,信号的调制频率通常在几十至几百兆赫兹之间。光波被物体反射后,经过透镜,被 ITOF 图像传感器接收。物体距离 ITOF 相机的远近将影响到达图像传感器光波信号的相位延时。图 2 进一步示意了进入 ITOF 图像传感器像素的光波信号和像素中抽头的光响应。周期为 T 的光波信号 $s(\tau)$ 经过飞行时间 t 进入图像传感器。图像传感器像素内部的抽头在调制周期内的不同时段依次收集光波信号,输出图像强度。设像素内部有 N 个抽头,令

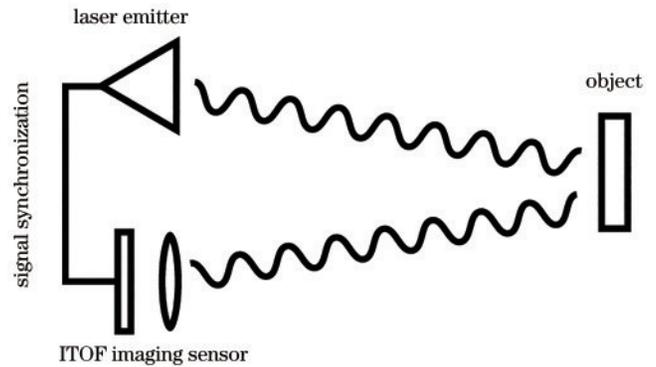


图 1 ITOF 相机测量示意图

Fig. 1 Measurement schematic diagram of the ITOF camera

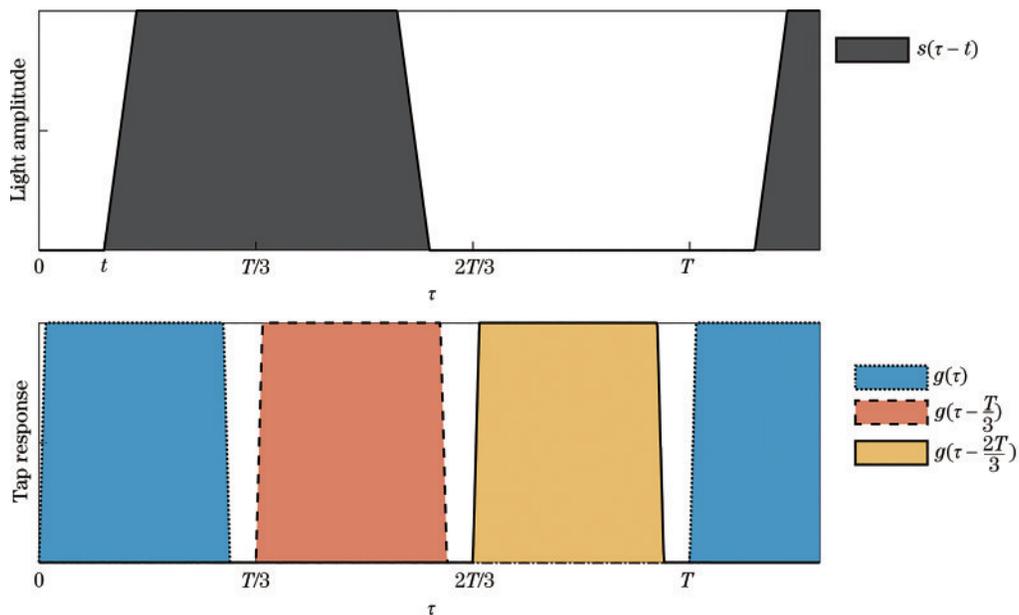


图 2 ITOF 像素的入射光幅值和抽头光响应

Fig. 2 Incident light amplitude and tap response of the ITOF pixel

$g\left(t - \frac{n}{N}T\right)$ 表示第 n 个抽头对光信号的响应, 则每个抽头输出的图像强度信号 I_n 表示为

$$I_n = \int s(\tau - t) g\left(\tau - \frac{n}{N}T\right) d\tau = \int s(\tau') g\left(\tau' + t - \frac{n}{N}T\right) d\tau' = c\left(t - \frac{n}{N}T\right), \quad (1)$$

式中: $c(t)$ 表示光信号与抽头光响应的相关信号。输出的图像灰度即为对相关信号 $c(t)$ 在周期内均匀进行 N 次离散采样的结果。

利用 N-Step 最小二乘相移公式, 可计算得到测量相位, 表示为

$$\varphi_m = \arctan \left[\frac{\sum_{n=0}^{N-1} I_n \sin(2\pi n/N)}{\sum_{n=0}^{N-1} I_n \cos(2\pi n/N)} \right] = \arg \left(\sum_{n=0}^{N-1} I_n e^{j2\pi n/N} \right), \quad (2)$$

式中: $\arg(\cdot)$ 表示复数的幅角。当相关信号为余弦信号时, 测量相位与飞行时间 t 呈线性关系。而实际情况中, 由于硬件限制和成本考量, 发射端发射的光波形无法为理想的余弦信号, 相关信号因此包含谐波成分。考虑相关信号 $c(t)$ 为周期信号但并非余弦信号的一般情况, 推导测量相位与飞行时间 t 的关系。相关信号的傅里叶展开表示为 $c(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} C(k) e^{j2\pi kt/T}$, 图像强度则可表示为

$$I_n = c\left(t - \frac{n}{N}T\right) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} C(k) e^{j2\pi k\left(t - \frac{n}{N}T\right)/T}, \quad (3)$$

代入相位计算公式, 得

$$\varphi_m = \arg \left[\sum_{n=0}^{N-1} \sum_{k=-\infty}^{\infty} C(k) e^{j2\pi k\left(t - \frac{n}{N}T\right)/T} e^{j2\pi n/N} \right] = \arg \left[\sum_{k=-\infty}^{\infty} C(k) e^{j2\pi kt/T} \sum_{n=0}^{N-1} e^{j2\pi(1-k)n/N} \right]. \quad (4)$$

对于级数 $\sum_{n=0}^{N-1} e^{j2\pi(1-k)n/N}$, 当 k 取值为 $1 + mN$ (m 为整数) 时, 其值为 N , 取其他值时为 0。简化式(4), 得

$$\varphi_m = \arg \left[N \sum_{m=-\infty}^{\infty} C(1 + mN) e^{j2\pi(1+mN)t/T} \right] = \arg \left[NC(1) e^{j2\pi t/T} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \frac{C(1 + mN)C^*(1)}{|C(1)|} e^{j2\pi mNt/T} \right] = \underbrace{\arg[C(1)]}_{\varphi_0} + \underbrace{2\pi t/T}_{\varphi_t} + \underbrace{\arg \left[\sum_{m=-\infty}^{\infty} C(1 + mN)C^*(1) e^{j2\pi mNt/T} \right]}_{H(\varphi_t)}, \quad (5)$$

式中: 上标 * 表示复数的共轭; 等式右侧第一项 φ_0 表示固定的相位零漂, 即相关信号不包含谐波成分且飞行

时间为零时对应的测量相位; 第二项 φ_t 为飞行时间引入的相位延迟, 为真实相位; 第三项 $H(\varphi_t)$ 为相关信号谐波成分导致的谐波误差。注意到 $\sum_{m=-\infty}^{\infty} C(1 + mN)C^*(1) e^{j2\pi mNt/T}$ 是周期为 T/N 的信号的傅里叶展开式, 又因周期函数的复合函数同样为周期函数, 因此可知谐波误差 $H(\varphi_t)$ 是周期为 T/N 的函数。

图 3 给出了三抽头 ITOF 相机谐波误差的仿真结果。图 3(a) 中示意了存在谐波成分偏离余弦波的相关信号 $c(t)$, 图 3(b) 中示意了真实相位 φ_t 与测量相位 φ_m 因此存在的非线性关系, 图 3(c) 中示意了以真实相位为自变量, 测量相位 φ_m 减去真实相位 φ_t 和相位零漂 φ_0 的谐波误差 $H(\varphi_t)$ 。可以发现, 谐波误差 $H(\varphi_t)$ 的周期恰为 $2\pi/3$ 。

尽管仿真结果验证了上述理论分析的正确性, 但若以真实相位 φ_t 为自变量拟合谐波误差 $H(\varphi_t)$, 已知测量相位 φ_m 反推真实相位 φ_t 时, 过程较为繁琐。为了方便校正过程, 定义谐波误差函数 $H'(\varphi_m)$ 为

$$H'(\varphi_m) = \varphi_t + \varphi_0 - \varphi_m. \quad (6)$$

设真实相位 φ_t 与测量相位 φ_m 的反向函数关系为 $\varphi_t = F(\varphi_m)$, 则有 $H'(\varphi_m) = F(\varphi_m) + \varphi_0 - \varphi_m$ 。谐波误差函数 $H'(\varphi_m)$ 是周期为 $2\pi/N$ 的函数的充要条件为 $H'(\varphi_m + 2\pi/N) = H'(\varphi_m)$ 。又因

$$\begin{aligned} H'(\varphi_m + 2\pi/N) &= F(\varphi_m + 2\pi/N) + \varphi_0 - (\varphi_m + 2\pi/N) = F[\varphi_t + \varphi_0 + H(\varphi_t) + 2\pi/N] + \varphi_0 - (\varphi_m + 2\pi/N) = \\ &= F[\varphi_t + 2\pi/N + \varphi_0 + H(\varphi_t + 2\pi/N)] + \varphi_0 - (\varphi_m + 2\pi/N) = \varphi_t + 2\pi/N + \varphi_0 - (\varphi_m + 2\pi/N) = \\ &= F(\varphi_m) + \varphi_0 - \varphi_m = H'(\varphi_m), \end{aligned} \quad (7)$$

得证谐波误差函数 $H'(\varphi_m)$ 是周期为 $2\pi/N$ 的函数。

图 3(d) 中示意了以测量相位 φ_m 为自变量, 真实相位 φ_t 和相位零漂 φ_0 减去测量相位 φ_m 的谐波误差 $H'(\varphi_m)$, 可以发现其具有与谐波误差 $H(\varphi_t)$ 同样的周期性。本文以测量相位 φ_m 为自变量, 对谐波误差 $H'(\varphi_m)$ 进行拟合以校正测量相位中的谐波误差。

3 谐波误差拟合校正

基于谐波误差的周期特性, 将谐波误差 $H'(\varphi_m)$ 近似为三角级数, 表示为

$$H'(\varphi_m) \approx \sum_{k=1}^K [a_k \cos(kN\varphi_m) + b_k \sin(kN\varphi_m)], \quad (8)$$

式中: K 为最高拟合阶次; a_k 和 b_k 为拟合系数。通过标定一组已知真实相位 $\varphi_t(1), \dots, \varphi_t(N)$ 对应的测量相

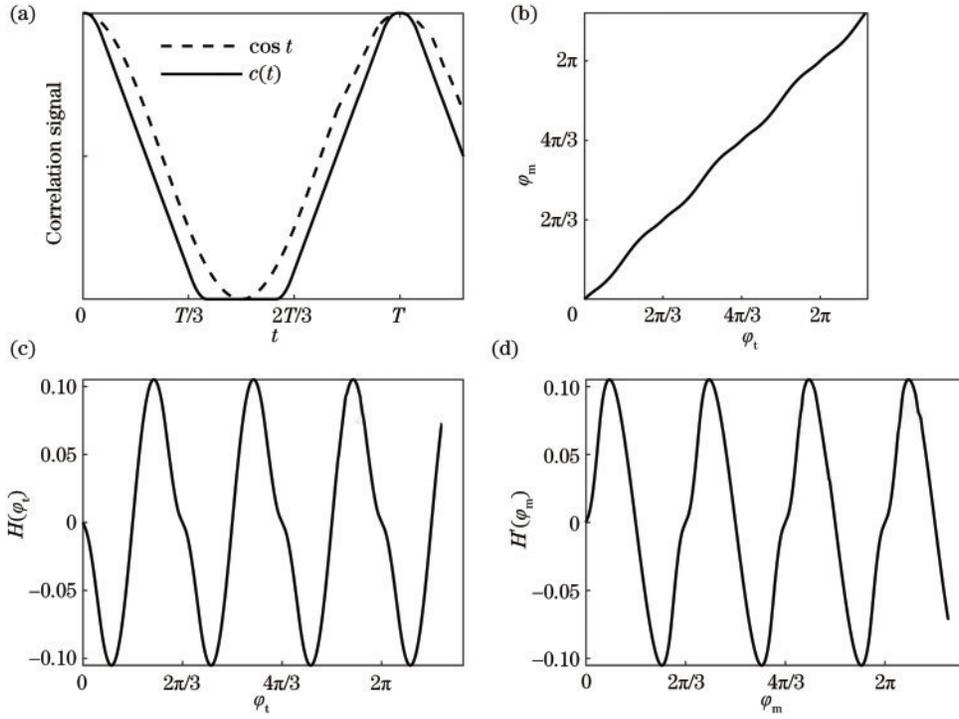


图3 三抽头ITOF相机谐波误差仿真。(a)相关信号;(b) φ_i 与 φ_m 的非线性关系;(c)谐波误差 $H(\varphi_i)$;(d)谐波误差 $H(\varphi_m)$
 Fig. 3 Simulation of harmonic error of a 3-tap ITOF camera. (a) Correlation signal; (b) non-linear relationship between φ_i and φ_m ; (c) harmonic error $H(\varphi_i)$; (d) harmonic error $H(\varphi_m)$

位 $\varphi_m(1), \dots, \varphi_m(N)$, 计算得到相位零漂 φ_0 和谐波误差拟合系数 $a_1, b_1, \dots, a_M, b_M$, 公式为

$$\begin{bmatrix} \varphi_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ b_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & \cos[N\varphi_i(1)] & \cdots & \sin[MN\varphi_i(1)] \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ -1 & \cos[N\varphi_i(N)] & \cdots & \sin[MN\varphi_i(N)] \end{bmatrix}^\dagger \times \begin{bmatrix} \varphi_m(1) - \varphi_i(1) \\ \vdots \\ \varphi_m(N) - \varphi_i(N) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中: \dagger 表示矩阵的伪逆。最后, 得到校正相位的公式为

$$\varphi_c = \varphi_m + \sum_{k=1}^K [a_k \cos(kN\varphi_m) + b_k \sin(kN\varphi_m)] - \varphi_0. \quad (10)$$

谐波误差标定装置如图4所示。ITOF相机放置于轨道台上, 在不同的距离处拍摄垂直于轨道台的平面, 利用采集的抽头图像灰度值计算测量相位。预先利用棋盘格或圆点标定板标定得到相机的主点、焦距、畸变参数, 与已知的平面距离, 可计算得到像素至平面点的距离并换算得到真实相位。获取标定数据后, 利用上述方法对标定数据进行拟合, 并补偿校正测量相位。

需要指出的是, 尽管可对ITOF相机中的像素逐个应用所提方法以拟合校正整幅图像的谐波误差, 但这种策略有两点不足, 一是谐波误差拟合参数多, 耗费较多存储空间, 二是数据采集过程中需保证所有像

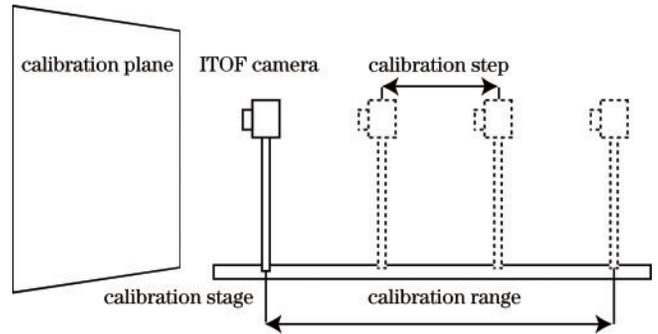


图4 谐波误差标定装置
 Fig. 4 Harmonic error calibration instrument

素均有足够的平面测量信息, 远距时需要大尺寸的平面保证ITOF相机视场角的覆盖。事实上, ITOF图像传感器通常是基于先进且成熟的CMOS制造工艺的, 不同像素抽头光响应的一致性可以得到很好保证, 因此可以假定像素的谐波误差是相同的, 然后对整幅图像的谐波误差拟合校正过程进行简化。本文仅对图像主点像素进行谐波误差拟合, 并代入主点像素谐波误差拟合参数至其余像素以计算相位零漂。这一策略的优点是仅需存储一组谐波误差拟合参数, 减少了存储空间, 同时标定时仅需在一个标定距离处确保ITOF相机的全视场角平面覆盖, 远距时仅需保证主点像素的平面覆盖, 只需较小尺寸平面即可完成标定数据采集。应用此策略时, 需注意标定范围和标定间距的设置。根据谐波误差周期特性, 标定范围无

需覆盖整个测距范围,而仅需覆盖一个谐波误差周期;标定间隔需满足采样条件,即最高拟合阶次确定时,标定间隔需小于最高拟合阶次信号对应的距离周期的 1/2,标定间隔确定时,最高拟合阶次信号对应的距离周期应大于标定间隔的 2 倍。短的标定间隔下可设定高的拟合阶次,减小拟合残差,但会增加数据采集耗时,因此设定标定间隔时还需权衡拟合误差与标定效率。相比在整个测量距离内进行稠密间隔标定的策略^[17-18],基于谐波误差周期特性的标定策略仅需对几处不同距离的平面标定数据,标定效率得到有效提高。

4 实验和结果分析

进行实验验证所提基于三角级数拟合校正 ITOF 相机谐波误差方法的有效性。实验使用奥比中光公司自研的 ITOF 相机,图像分辨率为 640×480,像素抽头数为 3,工作频率为 66.67 MHz,最大测量距离为 2250 mm。

利用标定轨道台,以 100 mm 为间隔,采集了 500 mm 至 2000 mm 的平面数据。图 5 中显示了图像主点像素真实距离与测量距离的差值随测量距离变化

而变化的情况。可以看到,谐波误差呈现明显的周期性,距离周期为 750 mm,为最大测量距离的 1/3,符合谐波误差周期性分析理论。

对主点像素的谐波误差进行拟合校正,以 500 mm 至 1300 mm 的平面数据作为标定数据,标定范围覆盖了一个谐波误差周期距离,其余 1400 mm 至 2000 mm 的平面数据作为验证数据。图 5 给出了不同最高阶次的拟合效果,为了表示方便,根据相位与距离的对应关系,相位单位以毫米显示^[9]。表 1 为使用不同最大拟合阶次时,标定数据的拟合残差和验证数据的校正误差。可以发现:当最高拟合阶次增加时,标定数据拟合残差减小,同时验证数据校正误差呈减小趋势;但当最高拟合阶次对应距离周期的一半小于标定间隔时,验证数据校正误差开始增大,这是由于标定时对谐波误差高阶拟合阶次信号的采样不足,导致了过拟合。因此标定间隔确定时,建议将最高拟合阶次设定为满足采样条件时的最高阶次,以达到最优的标定和验证效果。未校正时谐波误差导致的测量均方根误差(RMSE)为 39.4834 mm,最高拟合阶次设为 $K=3$ 时,校正后测量均方根误差为 2.5787 mm,减小了 93.47%,测量准确性得到提高。

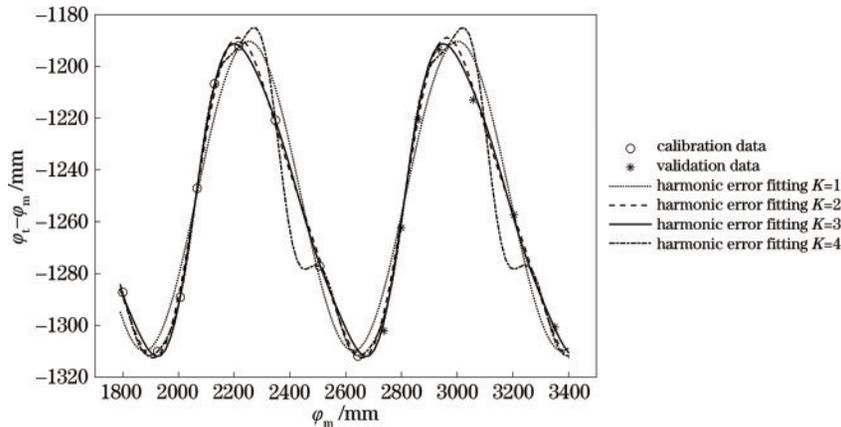


图 5 主点像素的谐波误差拟合

Fig. 5 Harmonic error fitting for principle point pixel

表 1 不同最高拟合阶次的距离周期、标定数据和验证数据均方根误差

Table 1 Distance period, root mean square error (RMSE) of calibration data and validation data for different highest fitting order

Parameter	$K=1$	$K=2$	$K=3$	$K=4$
Distance period /mm	750	375	250	187.5
RMSE of the calibration data	0.0228 rad	0.0067 rad	0.003 rad	0 rad
	8.1553 mm	2.3852 mm	1.0865 mm	0 mm
RMSE of validation data	0.0276 rad	0.0101 rad	0.00072 rad	0.0323 rad
	9.8707 mm	3.6298 mm	2.5787 mm	11.5566 mm

图 6 示例了 1500 mm、1700mm、2000 mm 三组平面数据的点云和拟合平面。图 6(a)、图 6(c)、图 6(e) 给出了未校正谐波误差的平面点云,可以看到,点云存在由谐波误差导致的不同程度的弯曲。图 6(b)、图 6(d)、图 6(f) 为对整幅图像进行谐波误差校正后的

平面点云,点云更加平整。表 2 进一步给出了谐波误差校正前后 1400 mm 至 2000 mm 平面点云数据偏离其拟合平面的 RMSE 对比。校正前,7 组平面距离点云偏离拟合平面的平均误差为 26.7055 mm,校正后为 4.3876 mm,点云平整度得到提高。图 6 和表 2 的对比

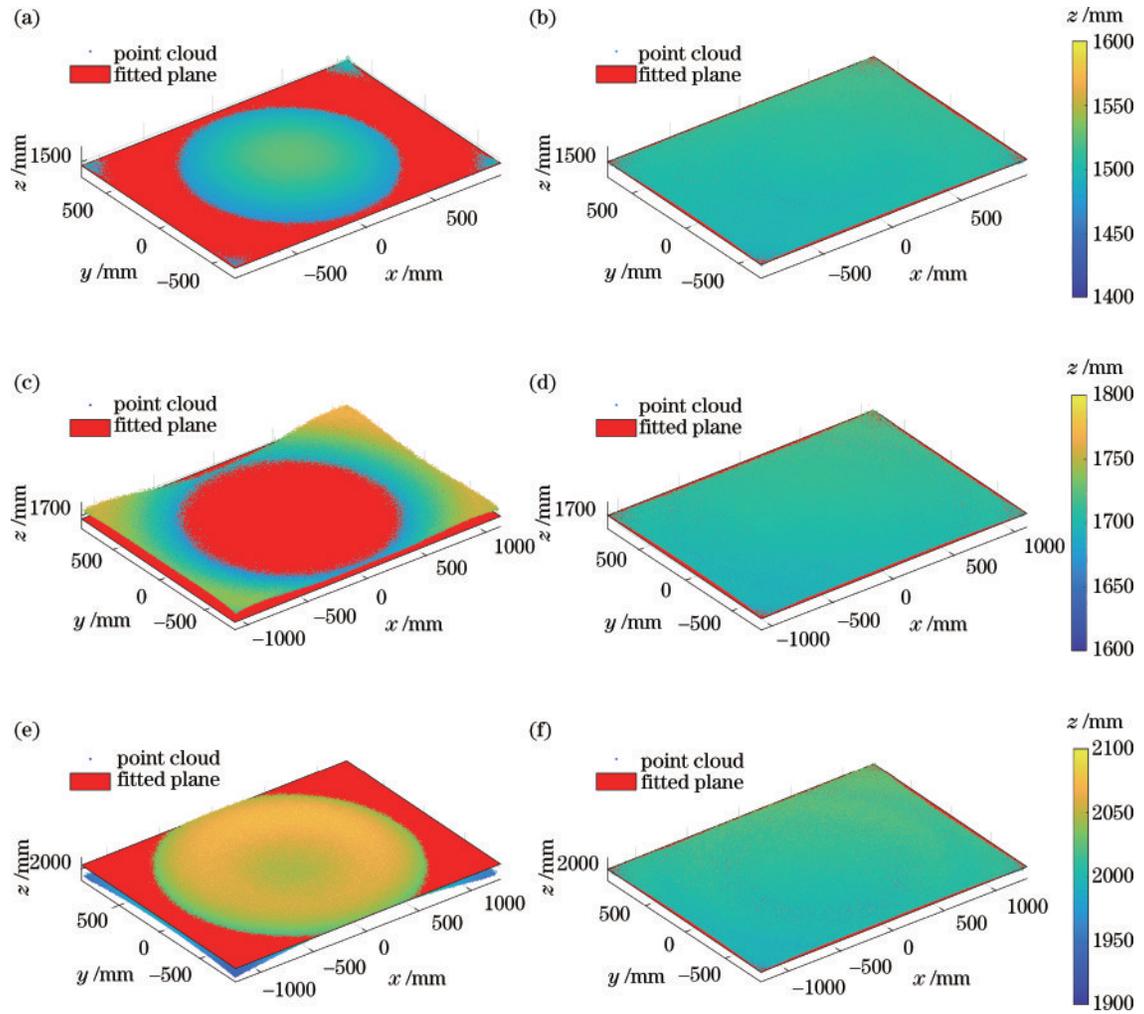


图 6 1500 mm、1700 mm、2000 mm 处平面的点云和拟合平面。(a)(c)(e)谐波误差校正前;(b)(d)(f)谐波误差校正后
 Fig. 6 Point cloud and fitted plane of 1500 mm, 1700 mm, and 2000 mm planes. (a) (c) (e) Before harmonic error correction; (b) (d) (f) after harmonic error correction

表 2 谐波误差校正前后 1400 mm 至 2000 mm 平面点云数据平面拟合的均方根误差

Table 2 RMSE of plane fitting of point cloud data from 1400 mm to 2000 mm plane before and after harmonic error correction

Plane distance/mm	RMSE before harmonic error correction /mm	RMSE after harmonic error correction /mm
1400	29.1314	3.4825
1500	22.1574	3.7269
1600	16.5045	4.2277
1700	33.3275	4.3753
1800	34.8804	4.5408
1900	21.2909	5.0163
2000	29.6467	5.3434
Average	26.7055	4.3876

结果表明了使用的整幅图像谐波误差补偿策略的有效性。同时可以发现,尽管标定范围未覆盖 1400 mm 至 2000 mm 平面,但基于谐波误差的周期特点,标定结果仍可有效应用于标定范围外的距离。

5 结 论

对 ITOF 相机的谐波误差进行了理论分析,阐明

了谐波误差周期与测距周期、抽头数量的关系,即谐波误差周期等于测距周期除以抽头数量。以谐波误差的周期特性为依据,使用三角级数拟合以校正谐波误差,并讨论了整幅图像中谐波误差的拟合策略以及标定数据采集的范围和间隔设置,相比在整个测量距离内进行稠密间隔标定的策略,标定效率得到提升。将所提方法用于实际 ITOF 相机的谐波误差校正,实验结果

表明,校正后主点像素测量误差从 39.4834 mm 降至 2.5787 mm,1400 mm 至 2000 mm 平面处点云偏离拟合平面的均方根误差均值从 26.7055 mm 减小为 4.3876 mm,谐波误差得到很好补偿,证明了所提方法的有效性。对谐波误差校正的理论和实验研究可用于指导 ITOF 相机产线生产制造过程中的深度标定流程,为 ITOF 相机走向更广泛的应用建立基础。

参 考 文 献

- [1] Weingarten J W, Gruener G, Siegwart R. A state-of-the-art 3D sensor for robot navigation[C]//2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), September 28-October 2, 2004, Sendai, Japan. New York: IEEE Press, 2005: 2155-2160.
- [2] Newcombe R A, Izadi S, Hilliges O, et al. KinectFusion: real-time dense surface mapping and tracking[C]//2011 10th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, October 26-29, 2011, Basel, Switzerland. New York: IEEE Press, 2012: 127-136.
- [3] Lagorio A, Tistarelli M, Cadoni M, et al. Liveness detection based on 3D face shape analysis[C]//2013 International Workshop on Biometrics and Forensics (IWBF), April 4-5, 2013, Lisbon, Portugal. New York: IEEE Press, 2013.
- [4] Ye X, Qian X, Chen Y X, et al. Chip-scale metalen microscopy for wide-field and depth-of-field imaging[J]. *Advanced Photonics*, 2022, 4(4): 046006.
- [5] Lu L P, Li J, Shu Y F, et al. Hybrid brightfield and darkfield transport of intensity approach for high-throughput quantitative phase microscopy[J]. *Advanced Photonics*, 2022, 4(5): 056002.
- [6] Park J, Brady D J, Zheng G A, et al. A review of bio-optical imaging systems with a high space-bandwidth product[J]. *Advanced Photonics*, 2021, 3(4): 044001.
- [7] Han S M, Takasawa T, Yasutomi K, et al. A time-of-flight range image sensor with background cancelling lock-in pixels based on lateral electric field charge modulation[J]. *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, 2014, 3(3): 267-275.
- [8] Ebiko Y, Yamagishi H, Tatani K, et al. Low power consumption and high-resolution 1280X960 Gate Assisted Photonic Demodulator pixel for indirect time of flight[C]//2020 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), December 12-18, 2020, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 2021: 33.
- [9] Foix S, Alenya G, Torras C. Lock-in time-of-flight (ToF) cameras: a survey[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2011, 11(9): 1917-1926.
- [10] He Y, Chen S Y. Recent advances in 3D data acquisition and processing by time-of-flight camera[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 12495-12510.
- [11] Bamji C, Godbaz J, Oh M, et al. A review of indirect time-of-flight technologies[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2022, 69(6): 2779-2793.
- [12] Payne A D, Dorrington A A, Cree M J, et al. Improved linearity using harmonic error rejection in a full-field range imaging system[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 6805: 68050D.
- [13] Payne A D, Dorrington A A, Cree M J, et al. Improved measurement linearity and precision for AMCW time-of-flight range imaging cameras[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(23): 4392-4403.
- [14] Payne A D, Dorrington A A, Cree M J. Illumination waveform optimisation for time-of-flight range imaging cameras[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8085: 80850D.
- [15] Streeter L, Dorrington A A. Simple harmonic error cancellation in time-of-flight range imaging[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(22): 5391-5394.
- [16] Feigin M, Whyte R, Bhandari A, et al. Modelling “wiggling” as a multi-path interference problem in AMCW ToF imaging[J]. *Optics Express*, 2015, 23(15): 19213-19225.
- [17] Kuhlmann T, Remondino F, Ingensand H. Calibration for increased accuracy of the range imaging camera swissranger[C]//Proceedings of ISPRS Commission V Symposium ‘Image Engineering and Vision Metrology’, September 25-27, 2006, Dresden, Germany. Germany: ISPRS, 2006: 136-141.
- [18] Lindner M, Kolb A. Lateral and depth calibration of PMD-distance sensors[M]//Bebis G, Boyle R, Parvin B et al. *Advances in visual computing. Lecture notes in computer science*. Heidelberg: Springer, 2006, 4292: 524-533.
- [19] Kim Y M, Chan D, Theobald C, et al. Design and calibration of a multi-view TOF sensor fusion system[C]//2008 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, June 23-28, 2008, Anchorage, AK. New York: IEEE Press, 2008.
- [20] Lindner M, Schiller I, Kolb A, et al. Time-of-Flight sensor calibration for accurate range sensing[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2010, 114(12): 1318-1328.
- [21] Li L W, Liu H W, Xu Y, et al. Measurement linearity and accuracy optimization for time-of-flight range imaging cameras[C]//2020 IEEE 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC), June 12-14, 2020, Chongqing, China. New York: IEEE Press, 2020: 520-524.